

entgehen meist der Intention des Hörers, dessen semantische Einstellung sich direkt über die Klangstruktur auf deren Ausdruck lenkt.

Also nur innerhalb dieser Grenzen können wir von semantischen Funktionen der Musik sprechen. Die Spezifik der Präsentation in der Musik liegt darin, daß sie nicht eindeutig ist, und daß sie nie so stark in den Vordergrund tritt wie in den eigentlich intentionalen Kunstarten. Darüber hinaus sind sie, wie bereits gesagt, zweierlei Typs: Die erste Art der Präsentation hat die Zweischichtigkeit der klanglichen darstellenden Strukturen als Voraussetzung, die zweite die Dreischichtigkeit der klanglichen ausdrückenden Strukturen. Die Musik kann die dritte semantische Funktion, die der Bezeichnung, niemals erfüllen, eben weil die Präsentation in ihr nicht eindeutig ist. Begriffliche Elemente kann sie daher im Husserlschen Sinn nicht „anzeigen“.

Obige, notwendigerweise sehr kondensierte Ausführungen können uns zu wichtigen Folgen für stilkritische, also historische Untersuchungen führen. Untersucht werden müßte auch das Problem, wie diese beiden Funktionen in den einzelnen Musikgattungen und den einzelnen Perioden der Musikgeschichte verwirklicht werden. Dies wäre jedoch gesondert zu behandeln.

WERNER LOTTERMOSER / BRAUNSCHWEIG

### *Akustik und Musik*

Dieser Bericht enthält einen Überblick über die hauptsächlichen Ergebnisse der letzten Jahre auf musikalisch-akustischem Gebiet unter besonderer Berücksichtigung der deutschen Arbeiten. Ziel solcher Forschungen ist, wie auch sonst bei naturwissenschaftlicher Betätigung, einmal die Herbeiführung technischer Fortschritte, aber auch die Gewinnung tieferer Einblicke in die Natur der Klänge. So alt die Musikausübung auch ist, nur stetig und organisch gewinnen wir physikalisch-akustische Erkenntnisse über das Wesen der Instrumental- und Vokalklänge und deren Auswirkungen auf unser Gehör. Wegen der Kürze der zur Verfügung stehenden Zeit war eine erschöpfende Darstellung des Gebietes unmöglich. Nur einige wenige Arbeiten, die im vorliegenden Zusammenhang besonders wichtig erschienen, sollen hier behandelt werden.

#### Schallwiedergabe und -aufnahme.

Die Schallwellen, die unsere Musikinstrumente erzeugen, werden von ausgedehnten schwingenden Flächen ausgestrahlt. Diese Erscheinung ist besonders auffallend bei Orchestern, in denen viele Spieler mitwirken. Die Wiedergabe durch nur einen Lautsprecher muß schon deshalb unvollkommen bleiben, weil dieser eine Schallquelle großer Konzentration darstellt. Kösters und Harz<sup>1</sup> haben einen Lautsprecher mit mehreren Systemen angegeben, welche nach allen Richtungen gleichmäßig abstrahlen. Eine Lokalisierung auf die Schallquelle hin, ist bei dieser Anordnung wegen der Reflexionen an den Wänden nicht mehr möglich. Es entsteht der sog. Raumklang, wie er bei geringerem Aufwand auch bei modernen Rundfunkgeräten auftritt. Buchmann<sup>2</sup> hat die Randdämpfung von Lautsprechermembranen durch Aufbringung zäher Kunststoffe erhöht und die parabelförmige Mantellinie des Membrankonus als besonders wirksam zur Vermeidung von Untertönen gefunden. Durch Benutzung von Zusatzlautsprechern auf elektrostatischer, piezoelektrischer und anderer Basis<sup>3</sup> gelang es, die obere Übertragungsgrenze bis über 15 kHz zu verlegen.

<sup>1</sup> H. Kösters und H. Harz, *Technische Hausmitteilungen des NWDR*, 3 (1951), S. 205.

<sup>2</sup> G. Buchmann, *Acustica* 4 (1954), S. 63.

<sup>3</sup> W. Kuhl, *Acustica* 4 (1954), S. 82. W. Kuhl, Gr. Schodder, F. K. Schröder, *Acustica* 4 (1954), S. 519.



Zur Schallaufnahme bzw. -wiedergabe stehen hochwertige Tonbandgeräte bereit, deren Frequenzumfang sogar bei der langsamen Bandgeschwindigkeit von 9,5 cm/s selbst bei akustischen Untersuchungen befriedigt. Um die zu messenden Schallvorgänge für die Suchtonanalyse<sup>4</sup>, die einige Minuten erfordert, vorzubereiten, schneidet man das interessierende Stück aus dem Tonband heraus, klebt es zu einem Ring und tastet diesen fortlaufend ab. Neuerdings hat Springer<sup>5</sup> Geräte zur zeitlichen Dehnung und Raffung von Schallaufnahmen unter Beibehaltung der Tonhöhe mittels rotierender Abtastköpfe angegeben. Dadurch erübrigt sich das Herausschneiden von Tonbandstücken.

Zur völlig naturgetreuen Wiedergabe wird die stereophone Technik angewandt. Dabei dienen mehrere im Abstand aufgestellte Mikrophone zur Aufnahme. Über entsprechend viele Kanäle erfolgt die Aufzeichnung auf gleich viele Tonspuren, die bei der Wiedergabe über getrennte Kanäle auf entsprechend aufgestellte, gleich viele Lautsprecher arbeiten. Dieses Verfahren wird in großem Maßstab beispielsweise bei dem Cinemascope verwendet, wobei sich auf dem Bildstreifen mehrere Magnettonspuren befinden. Über grundsätzliche Fragen der stereophonen Übertragung hat u. a. Vermeulen<sup>6</sup> berichtet.

### Stimmtonfrage

Zu einer in den beteiligten Kulturländern verbindlichen Stimmtonfestsetzung liegt eine gedruckte Empfehlung der ISO (*International Organization for Standardization*) vor, durch welche die Stimmtonhöhe des eingestrichenen a auf 440 Hz festgesetzt wird. Ob die daran anknüpfenden Bemühungen des deutschen Stimmtonausschusses, der vor einigen Tagen das Norm-Stimmtonblatt verabschiedet hat, zum Erfolg führen werden, hängt von der Einsicht und dem guten Willen der ausübenden Musiker und Dirigenten ab. Unter dem bisherigen Höherentreiben des Stimmtons litten vor allem die Sänger. Schon wegen der natürlichen Grenzen, welche der Stimme gesetzt sind, dürfte eine Stimmtonfestsetzung von Wichtigkeit sein, abgesehen von der Notwendigkeit, daß alle Musikinstrumente so gebaut werden, daß sie den Empfehlungen entsprechen.

Um zu erfahren, wie groß die Abweichungen von der Stimmtonfrequenz sind, bevor und während musiziert wird, wurden Messungen mit dem Südwestfunk-Orchester durchgeführt<sup>7</sup>, deren Ergebnisse Bild 1 zeigt. Im Diagramm unten links erkennt man die Frequenz des von verschiedenen Instrumenten gespielten Stimmtons. Auf der Abszisse ist die Zeit, auf der Ordinate die Frequenz aufgetragen, wobei der Abstand von Linie zu Linie 2 Hz beträgt. Die Aufnahmen geschahen mit einem Pegelschreiber. Einzelheiten über das Meßverfahren sind der angegebenen Originalarbeit zu entnehmen. Aus der Aufnahme wird deutlich, daß einige Instrumente das a' von 440 Hz wirklich treffen (1. Geige, Cello, Klarinette). Andere wie 2. Geige und Bratsche, Trompete und Tuba weichen bereits bis 2 Hz vom Stimmton ab. Nach dem Musizieren der Tragischen Ouvertüre von Brahms geben manche Instrumente wieder die gleiche Frequenz wie beim Einstimmen ab. Andere wie Klarinette und Tuba sind durch die Erwärmung beim Spiel bis 4 Hz höher geworden. Viel stärker als diese Unterschiede sind diejenigen während des Musizierens, wie man aus dem oberen Bild erkennt. Wenn alle Instrumente mitwirken, wie auf den oberen beiden Zeilen, schwankt das a' um maximal  $\pm 5$  Hz mit verschieden großer Schnelligkeit. Dies hat seinen Grund in der Beteiligung verschieden hoch intonierender Instrumente, wie auch im Vibrato der Streicher. H. Meinel<sup>8</sup> hat mit Recht auf die Stimmungsschwankungen hingewiesen, die sich durch das Spielen in nicht temperierter

<sup>4</sup> z. B. K. Tamm u. J. Pritsching, *Acustica* Beih. 1 (1951), S. 43.

<sup>5</sup> A. M. Springer, *Acustica* 5 (1955), S. 279.

<sup>6</sup> R. Vermeulen, nach *Acustica* 4 (1954), S. 682.

<sup>7</sup> W. Lottermoser und H. J. v. Braunmühl, *Acustica* Beih. 5 (1955), S. 92.

<sup>8</sup> H. Meinel, *Acustica* 5 (1955), S. 284.



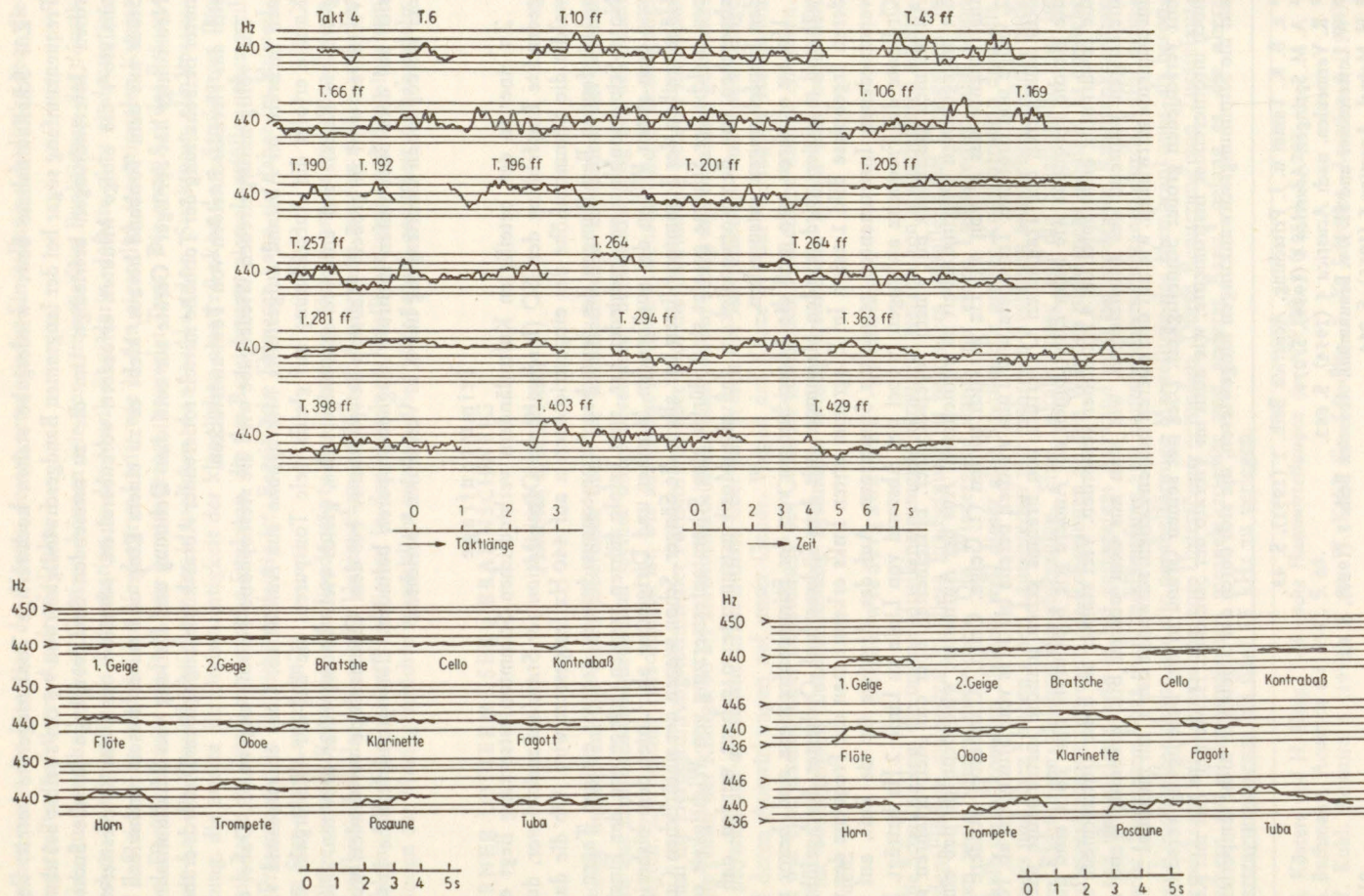


Abb. 1. Messungen der Stimmttonhöhe a' vor, während und nach dem Musizieren (nach Acustica, Beih. 5 [1955], S. 92)



Stimmung ergeben. Bemerkenswerterweise sind die Schwankungen dann besonders gering, wenn wie im Takt 205 ff. und 281 ff. vorwiegend die Blechbläser mitwirken. Rechnet man die gemessenen Frequenzabweichungen in das cent-Maß um, so erhält man Werte von  $\pm 19$  cents. Bekanntlich betragen die Abweichungen der temperierten von der reinen großen Terz 14 cents. Die gemessenen Tonhöhenschwankungen sind also größer als diese Stimmungsunterschiede. Aus dem vorliegenden Untersuchungsbefund kann geschlossen werden, daß es wenig sinnvoll ist, die Musizierstimmung zu normen, sondern lediglich die Frequenz des Ein- und Nachstimmens. In Westdeutschland stehen außer Stimmgabeln zwei Typen von Stimmtongeneratoren für diese Zwecke zur Verfügung<sup>9</sup>.

### Raumakustik

Aufschlußreiche Meßreihen zur Ermittlung der günstigsten Nachhallzeit großer Musikstudios verdanken wir Kuhl und Mitarbeitern<sup>10</sup>. Die Nachhallzeit ist bekanntlich nach Sabine als diejenige Zeit in Sekunden definiert, in welcher der Schalldruck während des Abklingens auf den 1000. Teil seines Anfangswertes abgesunken ist. Früher bereits hatten Knudsen<sup>11</sup> und andere auf Grund von Erfahrungswerten in bekannten Sälen und Kirchen angegeben, daß z. B. zur Orgel- und Oratoriumsmusik längere Nachhallzeiten über etwa 2 Sek., für Sprache ungefähr 1 Sek. günstig wäre. Zur Gewinnung genauerer Angaben über Orchestermusik ließ Kuhl 28 kurze, jeweils gleiche Ausschnitte aus Orchesteraufnahmen, die aus 20 verschiedenen Räumen stammten, durch etwa 150 Musiker und Ingenieure an verschiedenen Orten begutachten. Dadurch ergab sich als optimale Nachhallzeit für die Jupiter-Symphonie von Mozart etwas über 1,5 Sek., für die 4. Symphonie von Brahms 2,1 Sek., und für *Le sacre du printemps* von Strawinsky etwas weniger als 1,5 Sek. Diese Werte sind bemerkenswerterweise unabhängig von der Raumgröße.

Untersuchungen über die *Diffusität*, d. h. die Schallverteilung in Räumen, stammen von Furrer und Lauber<sup>12</sup>. Unter dem Begriffe der Diffusität versteht man den Grad der Schalldurchmischung. Man gewinnt dafür ein Maß dadurch, daß man im Raume die Unterschiede der Maxima und Minima des stehenden Schallfeldes ausmißt und durch deren Anzahl dividiert. Barockräume zeichnen sich beispielsweise infolge der starken Aufgliederung ihrer Wände durch eine besonders hohe Diffusität aus. Mit einem Mikrophon sehr starker Richtwirkung (Hohlspiegel) hat Thiele<sup>13</sup> die *Richtungsdiffusität* in verschiedenen Räumen gemessen. In einem Hallraum ist die Richtungsdiffusität gleich 100%, was bedeutet, daß dort infolge der Reflexion an den Wänden der Schall an jedem Punkte des Raumes aus allen Richtungen gleichmäßig einfällt. In den untersuchten Kirchen und Konzertsälen liegen die mittleren Werte zwischen 13 und 66%.

Stark beachtete Versuche über die Bemerkbarkeit von Echos hat H. Haas<sup>14</sup> angestellt. Er fand, daß solche Echos, welche nach 30 ms nach der primären Schallfront am Ohr eintreffen, gesondert gehört und dadurch als störend empfunden werden. Solche Echos, welche mit weniger als 30 ms Zeitdifferenz ankommen, tragen lediglich zur Lautstärkeerhöhung bei und wirken daher im erwünschten Sinne. Allgemein gilt, daß eine Schwächung der Echo-Intensität um 5 dB eine Verdoppelung der kritischen Laufzeitdifferenz zur Folge hat.

<sup>9</sup> Fa. Franz/Lahr, Fa. Wandel und Goltermann/Reutlingen.

<sup>10</sup> W. Kuhl, *Acustica* Beih. 4 (1954), S. 618.

<sup>11</sup> V. O. Knudsen, *J. Acoust. Soc. Am.* 2 (1931), S. 434; Fr. Watson, *J. Frankl. Inst.* 198 (1924), S. 73. S. a. die diesbezüglichen Veröffentlichungen in d. *Gravesaner Blättern*.

<sup>12</sup> W. Furrer und A. Lauber, *Acustica* 4 (1954), S. 29 und 2 (1952), S. 251.

<sup>13</sup> R. Thiele, *Acustica* Beih. 3 (1953), S. 291.

<sup>14</sup> H. Haas, *Acustica* 1 (1951), S. 49.



## Akustik der Musikinstrumente.

Durch ausgedehnte Messungen<sup>15</sup> gelang es, die Ursachen für die hervorragende Klangwirkung berühmter Barockorgeln zu ergründen und die Ergebnisse bei modernen Orgelbauten zu verwerten. Klanglich hochwertige Orgeln unterscheiden sich von anderen besonders durch die folgenden Eigenschaften:

1. Bei Verwendung der Tonkanzelle (Schleiflade) erfolgt das Einschwingen des Plenumklanges infolge der Kopplung der Pfeifen untereinander schneller als bei der Registerkanzelle. Hohe Frequenzkomponenten sind bei der Tonkanzelle mit großer Anfangsteilheit rascher aufgebaut, wodurch der Eindruck eines Anschlages entsteht, der an den des Cembalos erinnert. Bei der Registerkanzelle, bei welcher eine Kopplung unter den Pfeifen derselben Taste durch die gleiche Kanzelle fehlt, entstehen weniger präzise, etwas verwaschene Einsätze der Plenumklänge, die denjenigen des Harmoniums ähnlich sind. Darüber hinaus erlaubt die mechanische Traktur, den Verlauf des Ansprechens der Pfeifen zu beeinflussen (s. den Beitrag von W. Linhardt).
2. Im stationären Klang treten bei klanglich wertvollen Orgeln neben kräftigen Teiltönen niedriger Ordnung solche höherer Frequenzlage mit auffallender Systematik auf. Sie werden durch lautstärkemäßig fein abgegliche Mixturen, Scharffs oder Cymbeln hervorgerufen, wodurch den Klängen formantähnliche Farben und Helligkeiten verliehen werden.

Abb. 2 zeigt je 3 Beispiele der nun schon bewährten Methode der Oktavsiebanalyse in räumlicher Darstellung<sup>15</sup>. Links sind die Diagramme von drei untersuchten süddeutschen

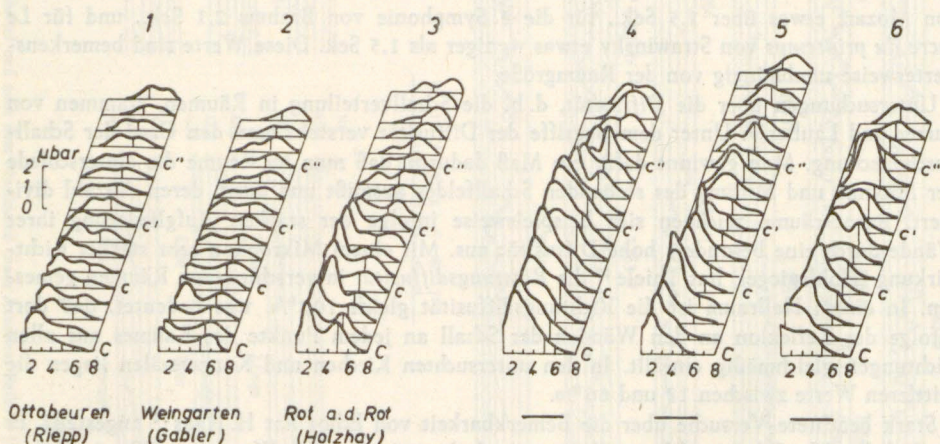


Abb. 2. Oktavsiebanalysen von Orgel-Plenumklängen, links drei süddeutsche Barockorgeln, rechts drei moderne Orgeln (Nach *Acustica*, Beih. 3 [1953], S. 129)

Barockorgeln wiedergegeben. Rechts wurden die Ergebnisse an drei modernen Orgeln dargestellt. Die Frequenz ist dabei jeweils nach rechts logarithmisch als Siebnummer aufgetragen. Über der jeweiligen Siebnummer bzw. Siebmitte wurde der hinter dem zugehörigen Oktavsieb gemessene Schalldruck in  $\mu\text{bar}$  linear aufgetragen und die dadurch gewonnenen Endpunkte miteinander verbunden. Die Kurven der Gruppen sind den zugehörigen Tasten entsprechend schräg nach oben aufgetragen, pro Oktave sind 4 Kurven vorhanden. Wegen

<sup>15</sup> W. Lottermoser, *Acustica* Beih. 3 (1953), S. 129; s. a. Beitrag in *Klangstruktur der Musik*, Berlin 1955.



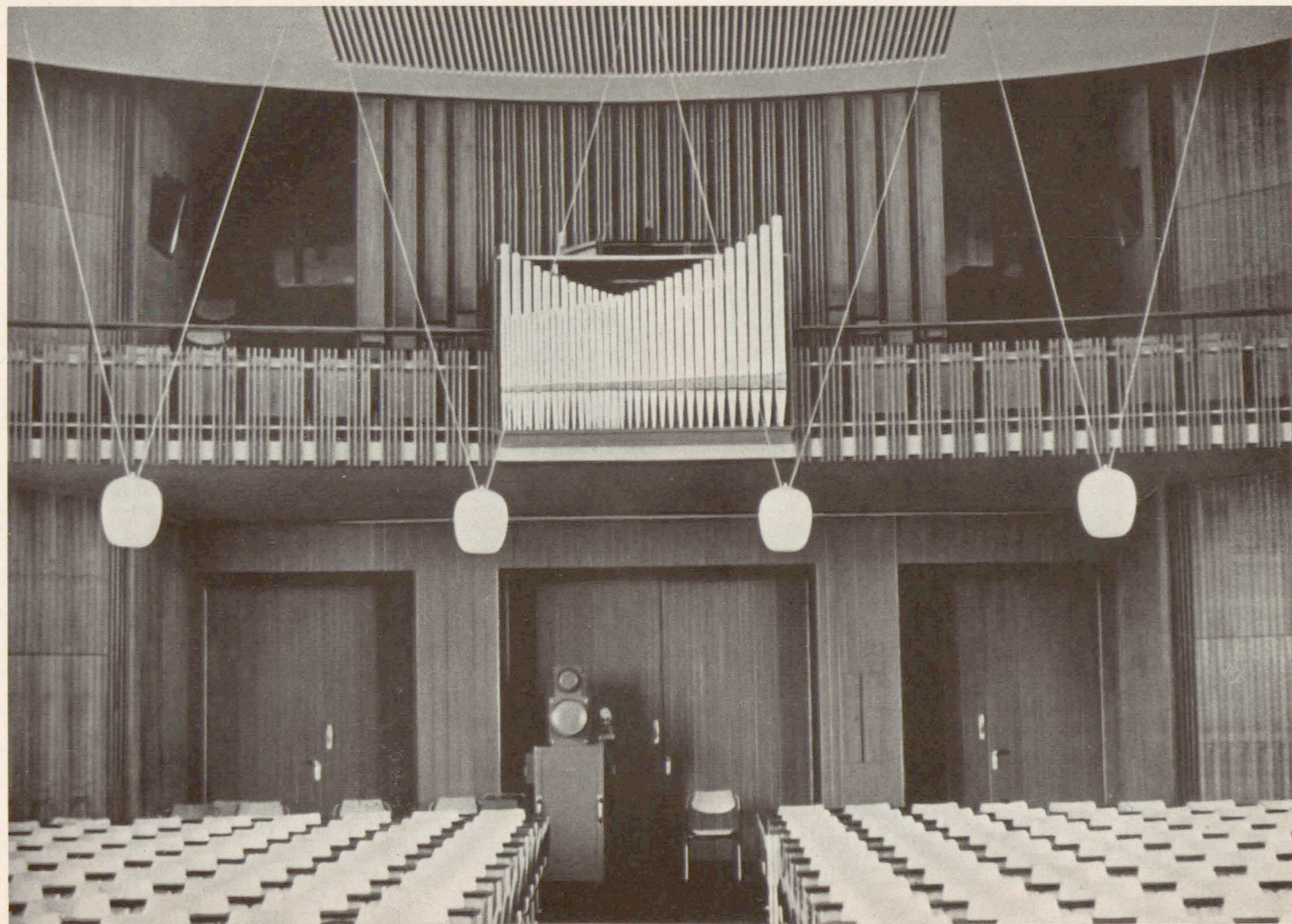


Abb. 4 Die neue Prætorius-Orgel in der Aula der Universität Freiburg i.Br. Hinter dem Gitterwerk in der Mitte: das Haupt- und Brustwerk, rechts und links Prospektpfeifen des Untersatz 16' im Pedal, in der Brüstung Rückpositiv mit Prinzipal 4' im Prospekt. In der Decke Gitterwerk zur Verbesserung der Abstrahlung.



Ort: Lübeck

Orgel: St. Marien

Erbauer: Kemper

Baujahr: 1955/56

Register:

Plenum HW

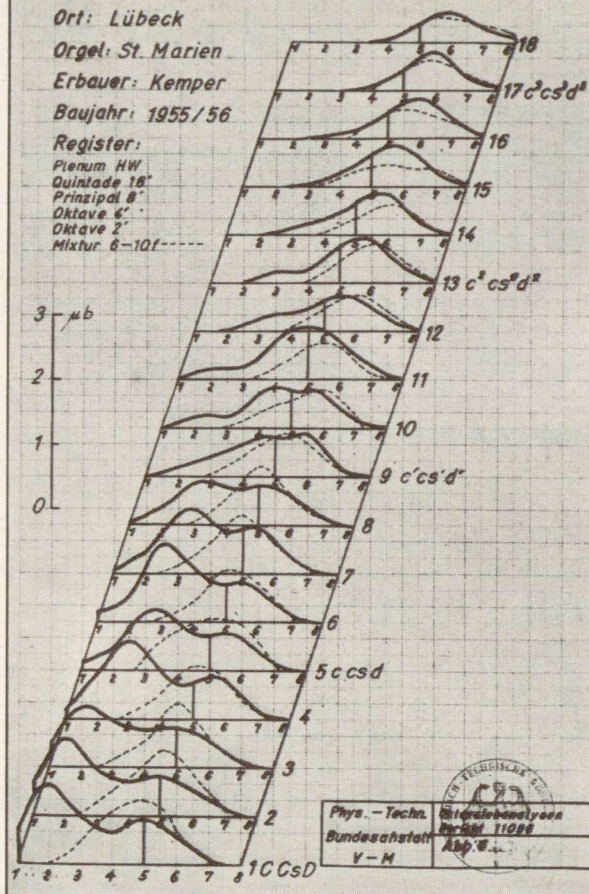
Quintade 16'

Prinzipal 8'

Oktave 6'

Oktave 2'

Mixtur 6-10f-----



Ort: Lübeck

Orgel: St. Marien

Erbauer: Kemper

Baujahr: 1955/56

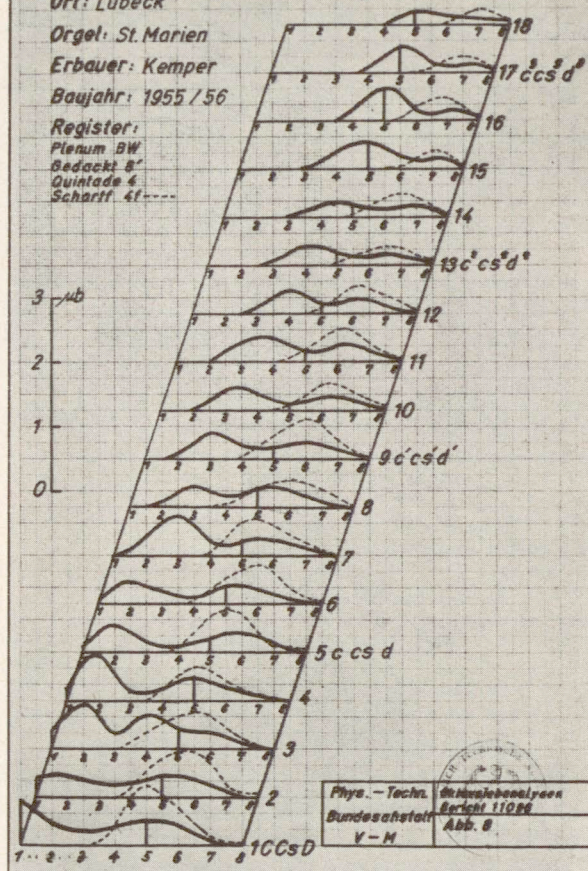
Register:

Plenum BW

Sedackt 8'

Quintade 4'

Scharff. 4f-----





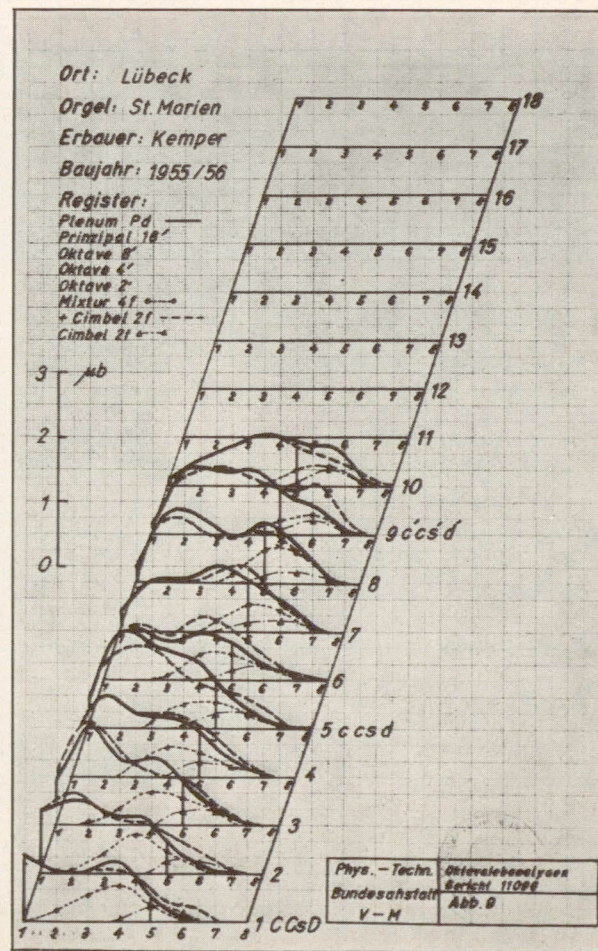
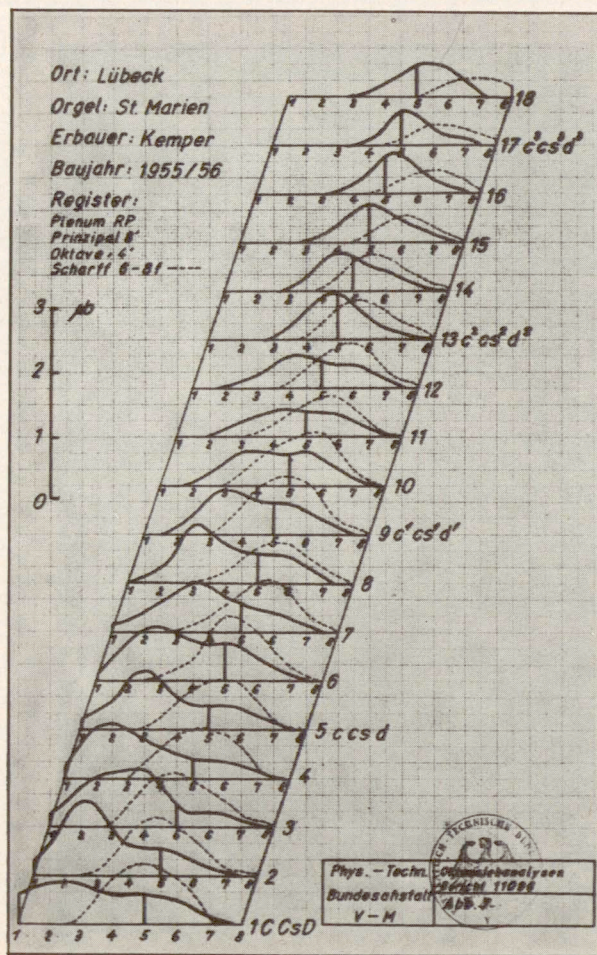


Abb. 5 Oktavsiebanaalyse der neuen Chor-Orgel in St.-Marien/Lübeck. Jeweils oben links: die das Plenum zusammensetzenden Register, gestrichelt: gemischte Stimmen allein (die Maxima übertreffen in manchen Fällen die Plenumkurven, weil beim Zuzug der Grundstimmen die Schalldrücke der gemischten Stimmen geringer werden).



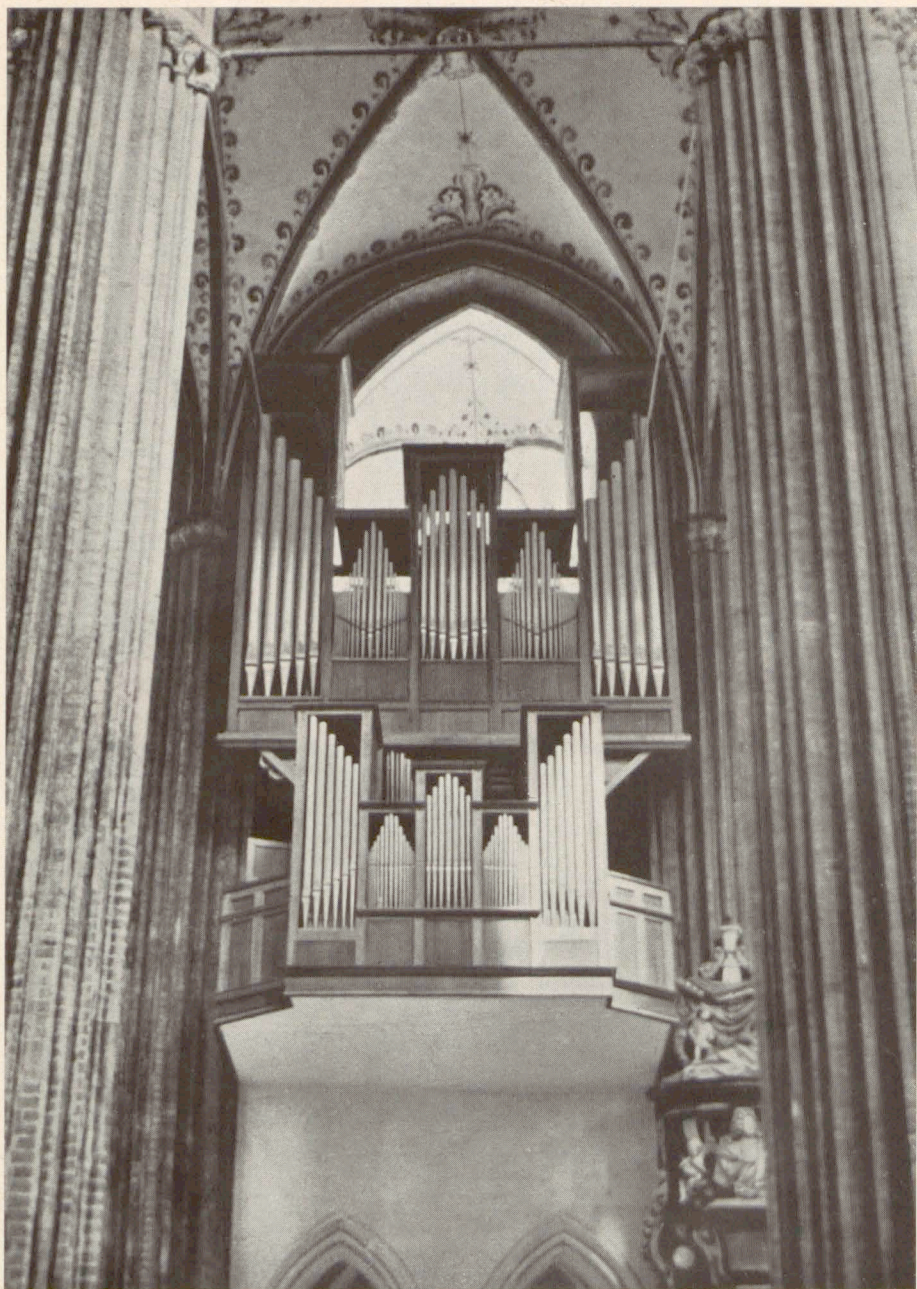


Abb. 6 Die neue Totentanz-Orgel in St. Marien/Lübeck. Mitte Hauptwerk, vorn Rückpositiv, dazwischen Brustwerk.



weiterer Einzelheiten des Meßverfahrens muß auf die Originalarbeit verwiesen werden.

Man erkennt bei den berühmten Barockorgeln (links) entsprechend ihrer geringeren Lautstärke niedrigere Niveaus, entsprechend ihrer größeren Farbigkeit höher liegende Maxima, die sich mit steigender Grundtonhöhe systematisch verschieben.

Diese Klangfarbenwandlung ist wichtig für die Durchsichtigkeit des polyphonen Spiels. Den Kurven der modernen Orgeln (rechts) fehlen diese höheren Maxima. Dagegen ist die Intensität in tieferen Frequenzbereichen besonders groß, so daß die Orgeln dunkel und stark klingen. Ihre Verwendungsfähigkeit für polyphones Spiel ist dadurch stark beschränkt.

Unter Benutzung der angedeuteten Ergebnisse wurden mehrere moderne Orgeln geplant, nachgemessen und abgeglichen<sup>16</sup>. Hier sollen aus der Reihe der Vorhaben nur die Prätorius-Orgel in Freiburg (erbaut von E. F. Walcker u. Cie / Ludwigsburg auf Veranlassung von Prof. D. Dr. Gurlitt) und die Totentanz-Orgel (erbaut von E. Kemper u. Sohn / Lübeck unter Beratung durch Prof. Kraft) in St. Marien—Lübeck als charakteristische Beispiele erläutert werden. Im Allgemeinen führen zwei Wege zu dem Ziele, Klänge gewünschter Zusammensetzung zu erhalten:

- a) In Freiburg<sup>17</sup> beispielsweise lagen die Messuren durch Überlieferung und durch die Angaben von Pfarrer Rößler vorher fest, und es handelte sich darum, die Raumakustik so zu gestalten, daß die Klänge der Orgel die oben genannten Eigenschaften erhalten.
- b) Im Fall der Marienkirche<sup>18</sup> lag die Raumakustik vor dem Orgelbau fest. Die Messuren wurden den besonderen raumakustischen Verhältnissen angepaßt, wobei sich interessanterweise Übereinstimmung zwischen neuer Planung und überlieferter Dimensionierung ergab.

Beide Orgeln haben Schleifladen und mechanische Traktur. Sie besitzen einen ähnlichen Werkaufbau: Hauptwerk, Rückpositiv, Brustwerk und Pedal. Die Prätorius-Orgel hat 27, die Totentanz-Orgel 42 klingende Stimmen. Bei ersterer sind Haupt- und Brustwerk vom gleichen Manual aus spielbar, während in St. Marien 3 selbständige Manuale vorhanden sind.

- a) Die Aula in der Freiburger Universität zeichnet sich durch einen elliptischen Grundriß aus, welcher störende Echo- und Fokussierungs-Erscheinungen verursacht. Im ursprünglichen Zustand genoß der Raum den traurigen Ruf einer äußerst schlechten Akustik<sup>19</sup>. Durch sägezahnförmige Aufgliederung der Wände wurde eine größere Diffusität erreicht. Durch Einbau von Schluckanordnungen für tiefere Frequenzen wurde ein Verlauf der Nachhallzeit erreicht, bei dem sowohl Sprache wie auch Orgelmusik zu befriedigender Wirkung gelangten. Zur Verbesserung der Abstrahlung des Pfeifenwerkes wurden Maßnahmen zur Schallreflexion wie zum Durchtritt des Schalles durch die Decke (s. Abb. 4) getroffen.

- b) In St. Marien wurden zunächst Nachhallmessungen angestellt, deren Ergebnis Abb. 3a zeigt. Danach beträgt die Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen ca. 9 Sek. Sie nimmt mit wachsender Frequenz stark ab. Um ein Maß dafür zu bekommen, in welcher Weise der Raum auf die Ausbreitung des Schalles einwirkt, wurde an die Stelle der zu erbauenden Orgel ein nach allen Richtungen gleichmäßig abstrahlender Lautsprecher gesetzt, der ein sog. weißes Rauschen abstrahlte, also ein Geräusch, in welchem alle Frequenzen mit nahezu gleicher Amplitude, statistisch verteilt, vorkommen. An mehreren Orten in der Kirche wurde die Zusammensetzung dieses durch den Raum beeinflussten Geräusches analysiert. Entsprechend dem Verlauf der Nachhallzeit zeigte sich die geringste Abnahme mit der Entfernung bei tiefen

<sup>16</sup> W. Lottermoser, *Zeitschrift f. Naturforschung* 11a (1956), S. 515.

<sup>17</sup> Über die Prätorius-Orgel soll ein Sonderheft, herausgeg. v. Prof. D. Dr. W. Gurlitt/Freiburg, erscheinen.

<sup>18</sup> Unveröffentlichte Berichte der PTB.

<sup>19</sup> Nach F. Trendelenburg, *Akustik*, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1950, S. 241.



Frequenzen. Dagegen war die gemessene Schwächung hoher Frequenzen, besonders hinter abschattenden Säulen, sehr groß. Die Abb. 3b zeigt die spektrale Schalldruckabnahme in Oktavsieben im dB-Maß an den Meßstellen. Durch diese Messungen wurde geklärt, wie stark die Veränderungen der zu erwartenden Orgelklänge im Raum sein würden. Es wurde daraus geschlossen, daß eine Beschallung des Raumes bei tiefen Frequenzen weniger intensiv

zu sein brauchte als bei hohen Frequenzen, wenn im Raume die als typisch für barocke Orgeln gefundenen Klänge auftreten sollten. Das bedeutet aber, daß die Baßpfeifen eine verhältnismäßig enge Mensur besitzen müssen, daß aber die hohen Pfeifen relativ weitere Durchmesser bekommen (Abb. 6). Es darf aber darauf hingewiesen werden, daß für andere Räume mit anderen akustischen Verhältnissen durchaus andere Dimensionierungen notwendig sein können.

Das Ergebnis der Messungen am fertigen Instrument zeigt Abb. 5. Die Totentanz-Orgel ist das erste durchgemessene moderne Instrument, bei dem die gleichen Schalldrucke, Klangspektren sowie Einschwingvorgänge festgestellt werden konnten, wie an den barocken Meisterinstrumenten. Die Diagramme zeigen, daß das Ziel, barocke Klänge mit den diesen eigenen Spektren zu erzeugen, erreicht wurde. Die Profile besitzen in fast allen Fällen Doppelmaxima, welche einerseits durch kräftige Grundtöne, andererseits durch formantbildende Mixturen, Scharffs und Cimbeln hervorgerufen werden. Die Plena dieser Werke zeichnen sich deshalb durch außerordentlich gesangreiche, farbige Klänge aus. Gestrichelt wurden die Meßergebnisse der gemischten Stimmen allein eingetragen, woraus man ihren Anteil an der Bildung der oberen Maxima erkennt.

Auf Untersuchungen an anderen Musikinstrumenten wie Glocken<sup>20</sup> und Geigen<sup>21</sup> kann hier nur hingewiesen werden. Ebenfalls sei wegen einer Beurteilung der elektronischen Musikinstrumente vom Standpunkt des Akustikers auch auf eine Veröffentlichung des Verfassers aufmerksam gemacht<sup>22</sup>. Grundsätzlich darf angegeben werden, daß diese Instrumente in der Lage sind, die stationären Vorgänge der überlieferten Instrumente nachzubilden und sogar neuartige Klänge zu erzeugen, dagegen fehlen ihnen die mannigfaltigen und wirksamen Einschwingvorgänge der überlieferten Instrumente, sofern das Instrument nicht selbst gestattet, die Ausbildung des Einschwingvorganges dem Spieler zu überlassen<sup>23</sup>. Bei Tasteninstrumenten Einschwingvorgänge nach Art der Pfeifenorgel nachzubilden, dürfte möglich, aber sehr aufwendig sein.

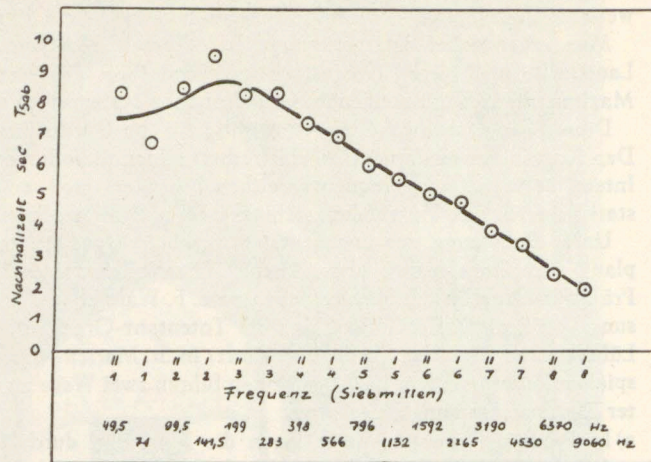


Abb. 3a. Raumakustische Messungen in St. Marien/Lübeck  
Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Frequenz

<sup>20</sup> E. Thienhaus, *Acustica* Beih. 2 (1952), S. 251.

<sup>21</sup> W. Lottermoser, erscheint demnächst in *Acustica*.

<sup>22</sup> W. Lottermoser, *AfMw* 4 (1955), S. 249.

<sup>23</sup> wie z. B. bei dem Electronium der Fa. Hohner, Trossingen.



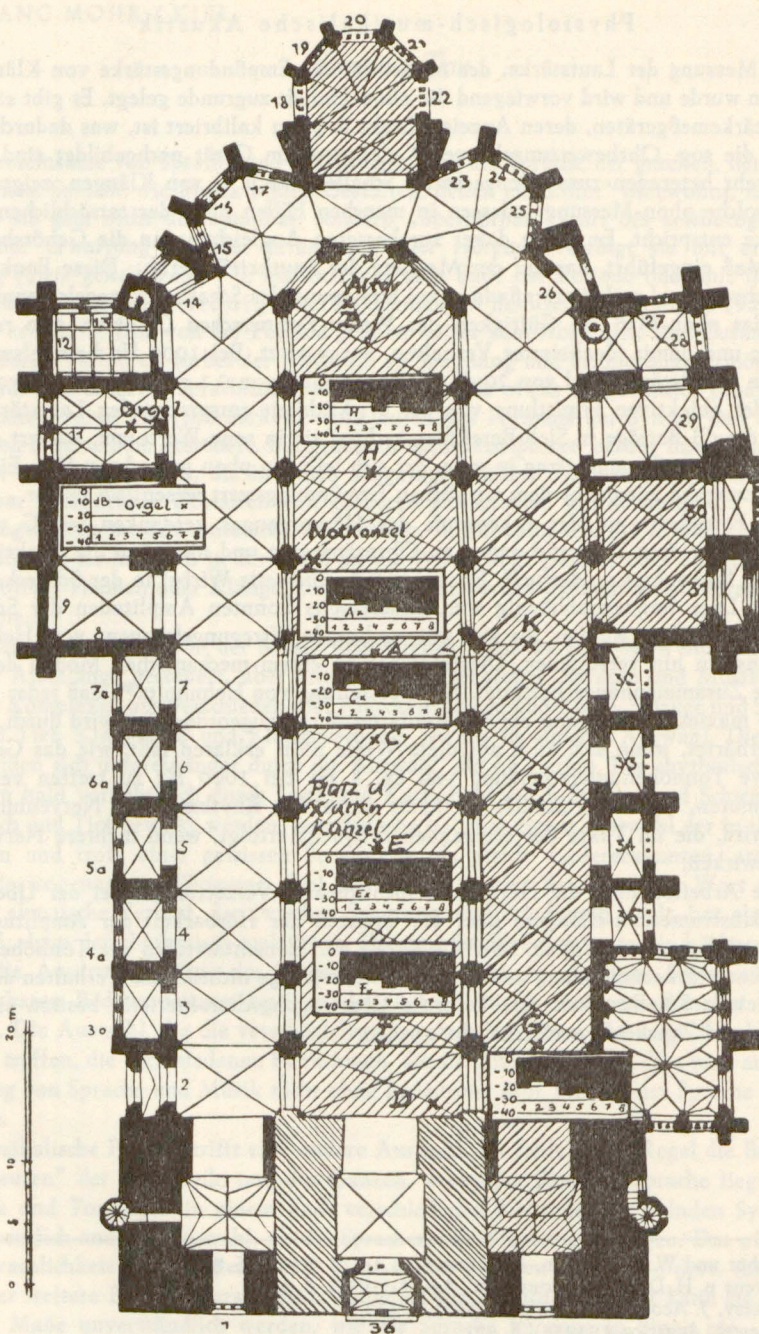


Abb. 3b. Raumakustische Messungen in St. Marien/Lübeck  
Verhalten des Schalldrucks in verschiedenen Abständen von der Orgel, angegeben als Schwächung in dB je Oktavsieb bezogen auf den Schalldruck in 1 m Abstand von der Schallquelle



### Physiologisch-musikalische Akustik

Bei der Messung der Lautstärke, des Maßes für die Empfindungsstärke von Klängen und Geräuschen wurde und wird vorwiegend die phon-Einheit zugrunde gelegt. Es gibt eine Reihe von Lautstärkemeßgeräten, deren Anzeige direkt in phon kalibriert ist, was dadurch erreicht wird, daß die sog. Ohrbewertungskurven<sup>24</sup> elektrisch im Gerät nachgebildet sind. Bei der Messung sehr heterogen zusammengesetzter Schalle, also u. U. von Klängen, zeigte es sich, daß eine solche phon-Messung indessen in manchen Fällen nicht der tatsächlichen Empfindungsstärke entspricht. Es wurde daher zur besseren Angleichung an die Gehörsbewertung das sone-Maß eingeführt, das auf der Messung der Lautheit<sup>25</sup> beruht. Diese Funktion gibt das Anwachsen der Lautheitsempfindung bei Steigerung des Schallstärkepegels genau wieder, während das phon-Maß die Gültigkeit des Weber-Fechnerschen Gesetzes, also rein logarithmisches und damit idealisiertes Verhalten, voraussetzt. Bei 1000 Hz beispielsweise entspricht dem Schallstärkepegel von 20 dB die Lauteinheit von 0,1 sone, bei 40 dB von 1 sone usw. Bei der objektiven Ermittlung von der Wirklichkeit entsprechenden Lautstärkewerten mißt man die dB-Beträge in Sieb-Bereichen, rechnet sie in sone-Werte um, addiert dieselben und gewinnt einen Gesamtbetrag in sone, der sich leicht in phon umrechnen läßt. Eine solche Lautstärkenangabe entspricht dem wirklichen Empfindungswert wesentlich besser.

Weitere Fortschritte in der Erkenntnis des Hörvorganges verdanken wir G. v. Békésy, welcher in zahlreichen Untersuchungen an Ohrpräparaten und Modellen die Funktionen des Mittel- und Innenohres studierte<sup>26</sup>. Es zeigen sich einerseits Wirbel in der Schneckenflüssigkeit, deren Lage frequenzabhängig war, andererseits konnten Amplituden der Schnecken-trennwand beobachtet werden, die sich mit wachsender Erregungsfrequenz vom Helicotrema zu den Fenstern hin verschieben. Diestel<sup>27</sup> hat an einem mechanischen Modell des Innenohres diese Zusammenhänge bestätigt. Die Vorstellung von Helmholtz<sup>28</sup>, daß jeder Frequenz eine Stelle maximaler Erregung auf der Basilarmembran zugeordnet ist, wird durch diese Ergebnisse erhärtet, wenn sich auch auf diese Weise nicht erklären läßt, wie das Gehör eine so selektive Tonhöhenunterscheidung von ca. 3 Hz bei 1000 Hz zu treffen vermag. Es ist zu vermuten, daß diese Schärfe vielleicht durch den Rhythmus der Nervenimpulse ermöglicht wird, die im Takte der erregenden Frequenz erfolgt, wenn mehrere Nervenfasern zusammenwirken.

Wichtige Arbeiten über die Hörbarkeit nichtlinearer Verzerrungen bei der Übertragung von Musikinstrumenten-Klängen, über die Grenzen der Hörbarkeit der Amplituden- und Frequenzmodulation von Tönen, über die Größe der Elementarstufen der Tonhöhenempfindung und Lautstärkeempfindung und über das merkwürdige nichtlineare Verhalten des Ohres, das bei kleinen Schalldrücken eine kubische Übertragungscharakteristik besitzt, sind durch Feldtkeller und Zwicker<sup>29</sup> veröffentlicht worden.

<sup>24</sup> H. Fletscher und W. A. Munson, *J. Acoust. Soc. Am.* 5 (1933), S. 82.

<sup>25</sup> S. S. Stevens u. H. Davis, *J. Acoust. Soc. Am.* 8 (1936), S. 1.

<sup>26</sup> G. v. Békésy, *J. Acoust. Soc. Am.* 19 (1947), S. 452.

<sup>27</sup> H. G. Diestel, *Acustica* 4 (1954), S. 421.

<sup>28</sup> H. v. Helmholtz, *Die Lehre von den Tonempfindungen*, Braunschwg., 5. Auflage 1896, S. 225 ff.

<sup>29</sup> R. Feldtkeller, *Acustica* 4 (1954), S. 70; dass. Beih. 3 (1953), S. 97; dass. Beih. 2 (1952), S. 117. E. Zwicker, *Acustica* Beih. 5 (1955), S. 67; dass. Beih. 3 (1953), S. 274.